

文章编号:1001-9081(2010)01-0249-04

## 硅太阳能电池视觉检测方法研究

张舞杰<sup>1</sup>, 李迪<sup>2</sup>, 叶峰<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广州 510641; 2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510641)

(zwjllht@scut.edu.cn)

**摘要:**硅太阳能电池生产过程中的检测是一个重要的环节,针对硅太阳能电池片的特点,提出了一种基于视觉检测的硅太阳能电池检测方法。通过拟合直线和圆进行外形尺寸的测量,并在此基础上通过计算边缘点到拟合直线或圆弧的距离进行外形破损检测。针对丝印后电池表面纹理结构比较复杂的特点,采用多模板匹配并结合差影的方法进行丝印缺陷检测。实验结果表明:提出的方法具有稳定、可靠和精度高等特点,达到了快速、有效地实现硅太阳能电池缺陷检测的目的。

**关键词:**光伏产业;硅太阳能电池;丝印;栅线;缺陷检测

**中图分类号:** TP394.1 **文献标志码:** A

## Investigation of visual inspection method for silicon solar cell

ZHANG Wu-jie<sup>1</sup>, LI Di<sup>2</sup>, YE Feng<sup>2</sup>

(1. College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510641, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510641, China)

**Abstract:** Quality inspection plays an important role in the process of silicon solar cell production. Based on the characteristics of silicon solar cell, a visual inspection method for silicon solar cell was proposed. Shape dimension was measured by line and circle fitting and based on which outline edge defect was implemented by calculating the distance from the edge points to fitting lines and circles. Since the surface texture structure is more complicated after screen printing, a multi-template matching method combined with image subtraction was adopted to detect the defects of screen printing. The experimental results show that the silicon solar cell inspection method is stable, reliable and of high precision, which achieves a rapid and effective silicon solar cell inspection.

**Key words:** photovoltaic industry; silicon solar cell; screen printing; finger; defect detection

### 0 引言

近年来,太阳能作为一种清洁能源得到了飞速发展,作为太阳能发电的主要载体,硅太阳能电池的产量迅速增长<sup>[1-3]</sup>。太阳能电池的生产需要相当多的工序,而检测又是其中必不可少的一道工序。随着全球太阳光伏产业的快速成长,对太阳能电池的质量检测也提出了更高的要求,其质量检测可分为电性能测试与表面质量检测。目前,绝大多数的太阳能电池生产厂家还是采用人工的方式进行表面质量检测,依赖作业人员的视觉判断,因此也带来了许多检测问题,同时产品质量很难得到保证。此外,人工检测时间短对缺陷判定上易落入主观看法而无法建立标准。其次,硅太阳能电池易碎,更适合采用非接触检测。与传统的人工检测相比,自动视觉检测具有以下特点:1)能够自动控制生产和检测过程;2)速度快、效率高;3)在整个检测过程中能够始终如一的工作,不会发生像人工检测那样由于疲劳等引起的人为误差,检测精度高;4)具有非接触的特点。因此,为了提高产品的质量和生产效率,采用自动视觉检测代替人工本检测具有重要的实用价值。文中研究以视觉检测技术来实现太阳电池的表面质量检测,以解决人工检测的不足<sup>[4-5]</sup>。

本文首先介绍了太阳能电池硅片的结构,并分析了其表面缺陷的种类。其次,根据缺陷的特点提出了基于自动视觉检测的方法,最后通过实验对上述方法进行了验证。

### 1 硅太阳能电池片结构及其表面缺陷分类

#### 1.1 太阳能电池硅片结构

目前,常用的太阳能电池硅片尺寸有两种,其尺寸规格分别是:125 mm × 125 mm, 156 mm × 156 mm。前者的外形由4条直线边和4段圆弧组成,后者由4条直线边和4个很小的倒角组成,如图1所示。正面是两条电极(负极)和栅线,背面是两条电极(正极)。

#### 1.2 硅太阳能电池表面缺陷分类

在对电池片进行处理的过程中,很容易导致其断栅、缺角、色差、脏污、水纹、破碎、裂痕等缺陷,若这些缺陷不能即时快速地被发现,将会影响到太阳能电池组件的质量。根据硅太阳能电池片的特点,其表面检测可以分为以下3项:1)尺寸测量;2)外形破损检测;3)丝印线路缺陷检测。在尺寸测量中,采用亚像素边检测、直线拟合、圆拟合和最小平方误差法来检测电池边缘,采用边缘点到拟合直线或圆的距离来判定边缘破损缺陷。常见的边缘破损缺陷有:缺角、边缘缺口、边

收稿日期:2009-08-09;修回日期:2009-09-29。

基金项目:中国博士后基金资助项目(20070420784);广东省工业攻关项目(2008B01040004)。

作者简介:张舞杰(1970-),男,湖南长沙人,博士,主要研究方向:图像处理、模式匹配、嵌入式系统、智能控制;李迪(1965-),女,山东青岛人,教授,主要研究方向:嵌入式系统、运动控制、工业过程控制;叶峰(1972-),男,湖北十堰人,副教授,主要研究方向:图像处理、运动控制、工业过程控制。

缘锯齿。常见的丝印线路缺陷有:断栅、栅线变厚、变薄、空洞、凹(凸)微粒、表面脏污、表面裂纹等。几种常见的硅太阳能电池片表面缺陷如图2所示。

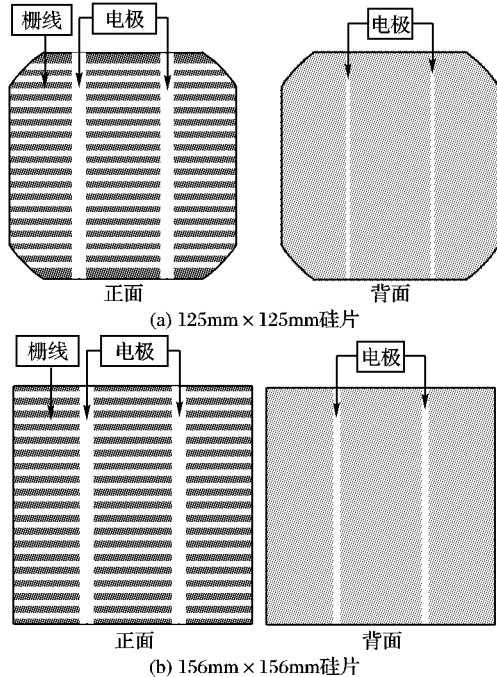


图1 125 mm × 125 mm 及 156 mm × 156 mm 太阳能电池硅片

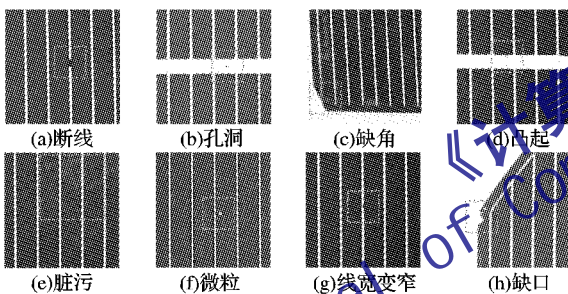


图2 常见的硅太阳能电池片表面缺陷

## 2 视觉检测算法及其实现

### 2.1 外形尺寸测量

由1.1节可知,常用的太阳能电池硅片有两种尺寸规格和外形,下面就分别对这两种外形和尺寸不同的硅片的外形尺寸测量方法进行分析。

#### 2.1.1 125 mm × 125 mm 外形尺寸测量

对于125 mm × 125 mm 的电池片,检测过程中采用专用的装置将其摆放水平,使其两条边与图像坐标系(图像的左

$$\begin{cases} x_0 = \frac{(\bar{x}^2 \cdot \bar{x} + \bar{x} \cdot \bar{y}^2 - \bar{x}^3 - \bar{x}\bar{y}^2) \cdot (\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - (\bar{x}^2 \cdot \bar{y} + \bar{y} \cdot \bar{y}^2 - \bar{x}^2\bar{y} - \bar{y}^3) \cdot (\bar{x} \cdot \bar{y} - \bar{x}\bar{y})}{2(\bar{x}^2 - \bar{x}^2) \cdot (\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - 2(\bar{x} \cdot \bar{y} - \bar{x}\bar{y})^2} \\ y_0 = \frac{(\bar{x}^2 \cdot \bar{y} + \bar{y} \cdot \bar{y}^2 - \bar{x}^2\bar{y} - \bar{y}^3) \cdot (\bar{x}^2 - \bar{x}^2) - (\bar{x}^2 \cdot \bar{x} + \bar{x} \cdot \bar{y}^2 - \bar{x}^3 - \bar{x}\bar{y}^2) \cdot (\bar{x} \cdot \bar{y} - \bar{x}\bar{y})}{2(\bar{x}^2 - \bar{x}^2) \cdot (\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - 2(\bar{x} \cdot \bar{y} - \bar{x}\bar{y})^2} \\ r = (\bar{x}_0^2 - 2\bar{x} \cdot \bar{x}_0 + \bar{y}_0^2 - 2\bar{y} \cdot \bar{y}_0 + \bar{x}^2 + \bar{y}^2)^{1/2} \end{cases} \quad (5)$$

式(4)中的参数有如下定义:

$$\bar{x}^m \bar{y}^n = \frac{\sum_{i \in E} x_i^m y_i^n}{E} \quad (6)$$

式中的  $i \in E$ ,  $E$  为所有边缘点的集合,  $(x_i, y_i)$  表示边缘点在图像中的坐标。

为了进一步提高拟合的精度,根据边缘点到拟合圆周的

距离来进行粗大误差点去除,具体算法见文献[6]。图4(a)

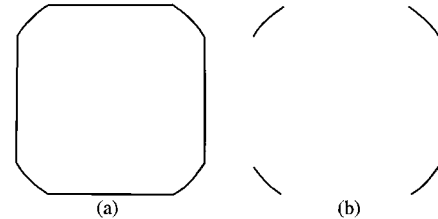


图3 边缘轮廓图像及圆弧轮廓图像

在采用上述投影法将直线边缘和圆弧边缘成功分离后,分别采用直线拟合和圆拟合,然后再计算直线间的距离及圆的直径,就可求得电池片的长度、宽度及圆的大小。直线拟合的公式如下。

设直线方程为:

$$y = ax + b \quad (1)$$

则根据最小二乘原理有:

$$\begin{cases} a = \frac{\bar{x} \cdot \bar{y} - \bar{x}\bar{y}}{\bar{x}^2 - \bar{x}^2} \\ b = \frac{\bar{x}^2 \cdot \bar{y} - \bar{x}\bar{y} \cdot \bar{x}}{\bar{x}^2 - \bar{x}^2} \end{cases} \quad (2)$$

当拟合直线与  $y$  轴平行时,  $\bar{x}^2 - \bar{x}^2 = 0$ , 则此时的直线方程为:

$$x = \bar{x} \quad (3)$$

式(2)和(3)中的参数有如下定义:

$$\bar{x}^m \bar{y}^n = \frac{\sum_{i \in E} x_i^m y_i^n}{E} \quad (4)$$

式中  $i \in E$ ,  $E$  为所有边缘点的集合,  $(x_i, y_i)$  表示边缘点在图像中的坐标。为了进一步提高拟合的精度,根据边缘点到拟合直线的距离来进行粗大误差点去除,具体算法见文献[6]。

将图3中的4段圆弧进行最小二乘圆的拟合后,就可求得圆的大小及其中心坐标,拟合后圆的参数为:

中给出了拟合后的直线边缘和圆弧边缘。

#### 2.1.2 156 mm × 156 mm 外形尺寸测量

由于其外形是由4条直线边和4个倒角组成,且4个倒角非常小,因此可以先拟合直线边缘,然后求得4条直线边缘的交点,计算交点到倒角边缘的距离来评估倒角的大小。分开4条直线边缘和4个倒角,可以采用2.1.1节中的投影法。如果倒角比较小(只有2~3个像素)投影法可能会将其归入到直线边缘,那么在进行直线拟合后,在求得直线方程的基础



上,计算拟合该直线的边缘点到该拟合直线的距离,如距离大于设定的阈值(文中为1 pixel)则认为该点不在直线边缘上,然后对这些点进行进一步的分析就可确定其是否是倒角处的边缘点。拟合的直线边缘及倒角如图4(b)所示。

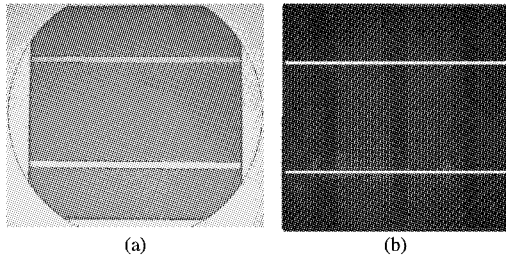


图4 拟合轮廓图像

## 2.2 外形破损检测

外形破损检测主要是检测电池片边缘上的缺口、锯齿状等及缺角等。缺口及锯齿状缺陷可以通过计算边缘点到拟合直线或圆的距离来判断,若边缘点到拟合直线或圆的距离大于设定的阈值,则认为该点存在外形破损缺陷。缺角的检测可以通过计算两相邻拟合直线边缘的交点到缺角边缘的距离来判断。图5为进行直线边缘上缺口及缺角检测示意图。图中的实线为电池片的进行边缘检测后的边缘,虚线为拟合的直线边缘及缺陷检测的标注。

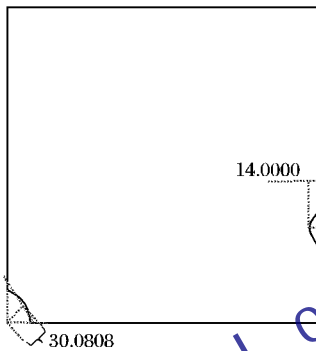


图5 外形缺陷检测示意图

## 2.3 丝印缺陷检测

由图1电池硅片的外形可知,丝印部分主要是电极和栅线,丝印缺陷检测主要是针对这两部分进行。

### 2.3.1 电极的缺陷检测

电极的缺陷主要表现为:孔洞、凸起和凹坑。针对电极的特点,采用直线拟合边缘的方法来计算电极边缘上的凸起和凹坑缺陷,具体方法和2.2节中外形缺陷的检测方法类似。孔洞在图像上表现为电极中间黑色斑点,且灰度值低,因此在图像上可以从电极的一条边向另一条边扫描,若某点的灰度值小于设定的阈值,则该点可能存在缺陷,若该点周围像素点灰度值小于设定阈值的数量大于设定的缺陷点的最低数量,则认为是孔洞缺陷。图6中是对电极的宽度进行测量及对孔洞、凸起缺陷进行检测。

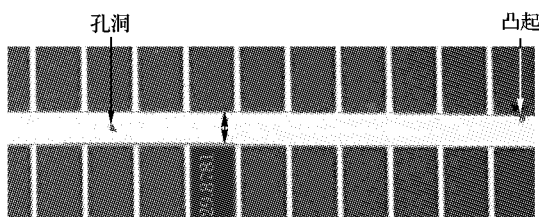


图6 电极缺陷检测及宽度测量

### 2.3.2 栅线的缺陷检测

由电池硅片的图像可知,栅线的缺陷主要表现为:断栅、

凸起和线宽变窄(栅线缺口)。由于栅线的存在,使丝印栅线后的电池片图像纹理结构较为复杂,这给缺陷检测带来了困难。为了提高检测的精度和效率,提出了一种多模板匹配的方法来实现缺陷检测。从电池硅片的图像可知,对于125 mm × 125 mm的电池片来说,由于存在圆弧,显然采用一个模板难以满足检测要求,因此以该尺寸类型的电池片的栅线缺陷检测为例来说明多模板的缺陷检测方法。根据电池片图像的特点,选用的模板如图7所示。

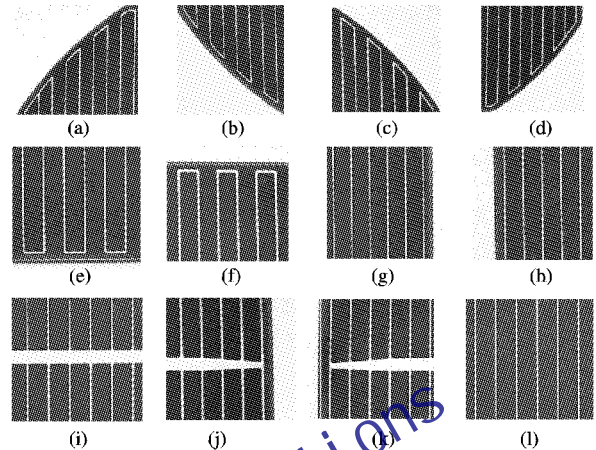


图7 匹配模板

图7中的模板是用在125 mm × 125 mm尺寸的带圆弧角的电池硅片的检测中,对于125 mm × 125 mm尺寸的没有圆弧角的只使用以上模板中的(e)、(f)、(g)、(h)、(i)和(l)。以上模板中(a)~(d)用在125 mm × 125 mm电池片的4个圆弧角的检测中,(e)~(h)用在上、下、左、右四条边的位置,(i)~(k)用在中间电极位置的检测,(l)用在中间无电极和不靠边的位置。在采用模板匹配到正确的位置后将模板图像和模板下方图像对应位置的像素灰度值相减,得到差影图像 $D(x,y)$ 。假设缺陷点与背景的灰度之差的阈值为 $T$ ,则对于满足

$$|D(x,y)| > T \quad (6)$$

的 $(x,y)$ 像素点,都可判定为是一个缺陷点。对缺陷的面积、长度、宽度等特征进行计算,对超过允许偏差的缺陷,视为不合格。图8是采用以上多模板匹配后栅线缺陷的检测结果,缺陷用虚线的矩形框标识。

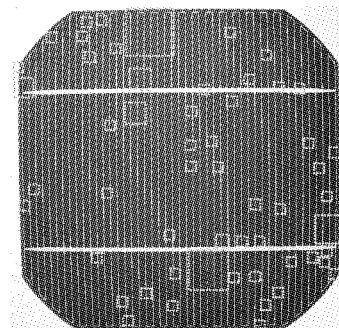


图8 模板匹配缺陷检测结果

## 3 实验结果和分析

实验中采用3264像素×2448像素图像来验证太阳能电池硅片尺寸量测和缺陷检测方法。采用4张太阳能电池硅片在相同情况下连续取8副图像做尺寸量测和缺陷检测,以检验文中检测方法的重复性和稳定性,125 mm × 125 mm太阳能电池硅片尺寸重复测量结果如表1所示,直线边、圆弧边及角

度的标号如图 9 所示。文中方法几乎可以百分之百地检验出所有瑕疵,其检测结果如图 8 所示。在 Intel Core 2 Duo E6400 2.13 GHz CPU 的环境下平均一张太阳能电池硅片的图像处理时间约为 2.3 s。实验结果显示,文中所提的方法能够完全满足太阳能电池片的检测要求。

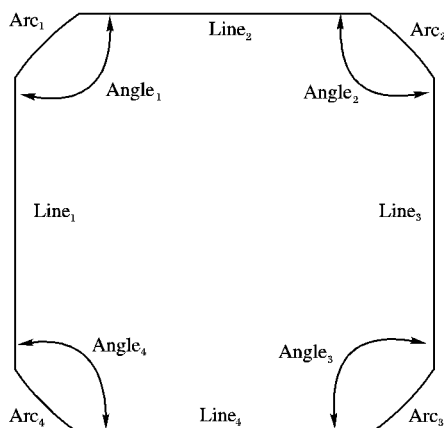


图 9 直线、圆弧边缘及角度标号

#### 4 结语

在分析太阳能电池硅片特点及其现有检测方法的基础上,文中提出了一种基于视觉的太阳能电池硅片尺寸测量及缺陷检测的方法。根据太阳能电池硅片的不同尺寸规格及特点,采用拟合的方法进行外形尺寸测量和外形破损检测。通过结合多模板匹配和差影法实现对断栅、栅线变厚、变薄,孔洞,凹、凸微粒,表面脏污,表面裂纹等缺陷的检测。实验结果显示,所提出的基于视觉的太阳能电池硅片的视觉检测方法能快速准确地实现其尺寸测量和缺陷检测,从而有效地提高了太阳能电池硅片的检测效率及质量,为实现太阳能电池硅片的自动检测提供了一种有效的方法。本方法只能对缺陷区

域进行探测,无法对缺陷进行分类,完成这些工作需要做进一步的研究。

表 1 8 次重复尺寸测量结果

参数		最大最小差值	均值	方差
交叉角 度/(°)	Angle <sub>1</sub>	0.001 5	89.781	1.26E-07
	Angle <sub>2</sub>	0.002 7	89.661	3.36E-07
	Angle <sub>3</sub>	0.001 8	90.707	1.65E-07
	Angle <sub>4</sub>	0.002 3	89.806	3.17E-07
直线边长 度/像素	Line <sub>1</sub>	0.105 3	1 536.100	1.29E-04
	Line <sub>2</sub>	0.089 4	1 535.134	3.46E-05
	Line <sub>3</sub>	0.152 6	1 535.221	2.13E-04
	Line <sub>4</sub>	0.142 8	1 539.098	1.89E-04
圆弧边长 度/像素	Arc <sub>1</sub>	0.075 4	1 094.104	3.45E-04
	Arc <sub>2</sub>	0.089 5	1 085.248	4.13E-04
	Arc <sub>3</sub>	0.102 7	1 081.222	5.43E-04
	Arc <sub>4</sub>	0.052 8	1 088.468	2.39E-04

#### 参考文献:

- [1] 何晓春. 光伏产业的大机会才刚开始[EB/OL]. [2009-04-24]. <http://www.newenergy.org.cn/html/0096/640927713.html>
- [2] 张世强, 李万河, 徐品烈. 硅太阳能电池的丝网印刷技术[J]. 电子工业设备, 2007, 36(5): 55-59.
- [3] FU ZHUANG, ZHAO YAN ZHENG, LIU YANG, et al. Solar cell crack inspection by image processing[C] // International Conference on Business of Electronic Product Reliability and Liability. New York: IEEE, 2004: 77-80.
- [4] 张舞杰, 李迪, 叶峰. 基于计算机视觉技术的微钻刃面自动光学检测[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2006, 34(11): 55-59.
- [5] 张舞杰, 杨义禄, 李迪, 等. 自动影像测量系统关键算法研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 294-301.
- [6] 张舞杰. 基于计算机视觉影像检测的关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学机械与汽车工程学院, 2007.

(上接第 245 页)

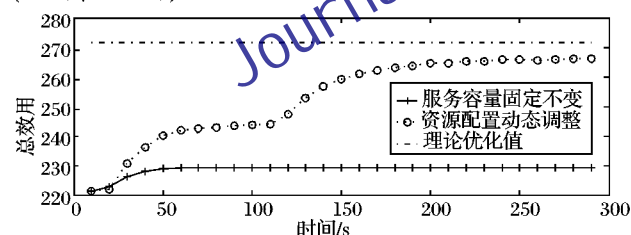


图 3 动态资源配置下的用户总效用

#### 4 结语

本文以区分服务网络中的 DSCP 设定为应用背景,探讨基于动态区别定价的多 QoS 服务选择和资源配置问题。在用户端,从多服务效用函数的特性出发,基于效用最大化原则来设定数据包的 DSCP,将服务优先级设定问题转化为服务令牌分配问题。在网络端,提出在小时间尺度上根据服务需求量和资源配置情况调整服务价格,在大时间尺度上根据价格设置的逻辑合理性调整资源配置方式。该算法机制通过价格调整和资源配置,将应用层面的 QoS 选择和设定,转化为技术层面的服务令牌分配,有助于提高区分服务的可部署性,解决多优先级网络的优化配置问题。

#### 参考文献:

- [1] JIN N, JORDAN S. On the feasibility of dynamic congestion-based pricing in differentiated services networks[J]. IEEE/ACM Transac-

tions on Networking, 2008, 16(5): 1001-1014.

- [2] XU D, LI Y, CHIANG M, et al. Elastic service availability: Utility framework and optimal provisioning[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(6): 55-65.
- [3] COCCHI R, ESTRIN D, SHENKER S, et al. A study of priority pricing in multiple service class networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1991, 21(4): 123-132.
- [4] WANG X, SCHULZRINNE H. Pricing network resources for adaptive applications in a differentiated services network[C]// IEEE INFOCOM'01. Washington, DC: IEEE, 2001: 943-952.
- [5] CARRIG B, DEDIEFFE D, MURPHY J. A congestion-only charging mechanism for multiplayer gaming in differentiated services networks[C]// IEEE GLOBECOM'07. Washington, DC: IEEE, 2007: 1916-1920.
- [6] REICHI P, FLURY P, GERKE J, et al. How to overcome the feasibility problem for tariffing Internet services: The Cumulus pricing scheme[C]// IEEE ICC'01. Washington, DC: IEEE, 2001: 2079-2083.
- [7] SHU J, VARAIYA P. Pricing network services[C]// IEEE INFOCOM'03. Washington, DC: IEEE, 2003, 2: 1221-1230.
- [8] VARIAN H. Estimating the Demand for Bandwidth. [2009-08-01]. <http://www.sims.berkeley.edu/~hal/Papers/wtp/wtp.pdf>.
- [9] 效用函数的性质及最大化问题[EB/OL]. [2009-08-01]. <http://web.cenet.org.cn/upfile/88168.pdf>.